

9. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – К.: Наук. думка, 1976. – 320 с.
10. Винокуров В.А., Григорянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
11. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. – К.: Изд-во ИНДПРОМ, 2001. – 815 с.

12. Підстригач Я.С., Ярема С.Я. Температурні напруження в оболонках. – К.: Вид-во АН УРСР, 1961. – 212 с.
13. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 с.
14. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности: В 2-х т. – К.: Наук. думка, 2002. – Т. 1.: Методология. – 2002. – 407 с.

УДК 622.692.4

## ВПЛИВ НАВОДНЕННЯ НА КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ ШВІВ ГАЗОПРОВОДІВ

Є.І.Крижанівський, О.С.Тараєвський, Д.Ю.Петрина

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42464,  
e-mail: rector@nung.edu.ua

*Представлены результаты экспериментальных исследований и проанализированы влияния наводороженной среды, а также концентраций напряжений на механические свойства сварных соединений. Разработана методика и установлены закономерности разрушения материала сварных соединений газопроводов при статическом и низкочастотном нагружении при влиянии наводороженной среды, а также концентраторов напряжения. Рассмотрены некоторые аспекты механизма разрушения сварных соединений при действии наводороженной среды, а также концентраций напряжений.*

*The results of the experimental researches have been represented and the influences of hydrogenated medium as well as pressure concentration upon the mechanical properties of welded joints have been analysed. The technique has been developed and the regularities of material destruction of gas mains welded joints at static and low frequent load influenced by hydrogenated medium, as well as pressure concentrators, have been determined. Some of aspects of destruction mechanisms of welded joints influenced by hydrogenated medium, and pressure concentrations have been examined.*

Більшість магістральних газопроводів експлуатуються уже тривалий час і немало з них відпрацювали амортизаційний термін. Щоб надійно оцінити працездатність трубопроводів, необхідний комплексний підхід, однією з важливих складових якого є визначення впливу наводнювального середовища та концентраторів напружень на руйнування газопроводів, зокрема, у місцях із дефектами та в зварних з'єднаннях, з якими пов'язано 70-80% усіх відмов трубопроводів, що експлуатувалися протягом 30 років [4, 5]. Особливо це стосується зварних кільцевих швів, які після зварювання, як правило, додатково не обробляються, щоб зменшити залишкові напруження. Умови експлуатації магістральних газопроводів через дію катодного захисту передбачають можливість наводнювання і відповідно небезпеку руйнування, спричинену явищем водневої крихкості. Враховуючи особливості експлуатації газопроводів як зварної конструкції, під час руйнування якої поряд із корозійним розтріскуванням проявляються дії корозійної втоми, останнім часом вивченню впливу відносно малої кількості циклів навантаження на довговічність трубопроводів надають особливого значення [1, 2, 6]. Реалізація таких досліджень, а особливо довготривалих випробувань, необхідних для правильного визначення ресурсу роботи трубопроводу, вимагає

створення нових методологічних підходів до постановки та проведення експерименту.

З цих позицій важливу інформацію відносно корозійної витривалості зварних з'єднань магістральних газопроводів можна отримати, будуючи діаграми втоми у координатах  $\sigma - \ln N$ , враховуючи робочі параметри та дію корозійно агресивного середовища, оскільки наявний матеріал щодо корозійної втоми зварних з'єднань магістральних газопроводів досить обмежений. Отримані відомості відносно корозійної втоми у агресивному наводнювальному середовищі, у тому числі з поверхневими концентраторами у різних зонах зварного з'єднання, дають змогу під час проектування газопроводів користуватись достовірними вихідними даними, необхідними для прогнозування ресурсу роботи магістрального газопроводу.

Відомо, що процеси наводнення зумовлені не тільки наводнювальним середовищем, але й умовами навантаження та наявністю концентраторів напружень, у яких водень локалізується, що додатково підвищує ймовірність руйнування. В магістральних газопроводах під час нерівномірного газоспоживання змінюється напружений стан трубопроводу, що призводить до руйнування плівок, оголюється свіжа поверхня металу труби, яка інтенсивніше наводнюється. Зважаючи на особливу небезпеку при

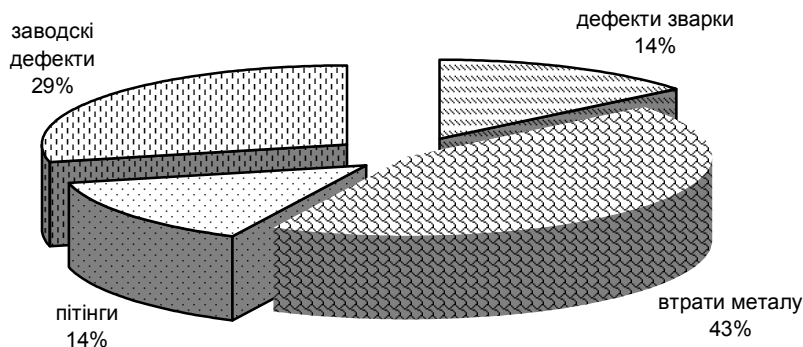


Рисунок 1 — Виявлення дефектів у газопроводах

руйнуванні газопроводів, зараз значна увага приділяється методам оцінки схильності матеріалів і зварних з'єднань до водневої крихкості, що у ряді випадків дає можливість прогнозувати довготривалу корозійно-втомну міцність газопроводів [1, 2, 3]. Відкритим є питання виявленого в ряді випадків зниження границі текучості – це підходить під модну зараз теорію пластифікації, спричиненої воднем [3, 6]. Для оцінки стану магістрального газопроводу пропускають інтелектуальний поршень, що дає змогу виявити найбільш небезпечні ділянки труб. Дані щодо дефектів газопроводів, що працюють понад 20 років, зображені на рис. 1. Слід зазначити, що втрати металу та пітінги (57% дефектів у газопроводі) виявлені як у зварному з'єднанні, так і біля зварного шва.

В металі труб, віддалених від зварного шва, наскрізних руйнувань за період експлуатації практично не виявлено. Усі тріщини у зварному з'єднанні поширюються перпендикулярно до осі труби, їх виникнення зумовлено одночасною дією водневої крихкості металу та високими напруженнями у зоні термічного впливу, стиках кільцевих швів. Наявність концентраторів напружень у зварному з'єднанні у вигляді непроварів, несплавлення, підрізів переносить початок руйнування у зону дефекту [4, 5, 6].

Отримані результати обстеження газопроводу інтелектуальним поршнем дають підстави стверджувати, що зварні з'єднання газопроводів часто є найбільш уразливими ділянками з точки зору їх пошкодження та руйнування, особливо в умовах наводнення металу. З іншого боку, склад газу та умови експлуатації газопроводів передбачають можливість такого наводнення і відповідно небезпеку руйнування, спричинену явищем водневої крихкості.

**Метою даної роботи** є проведення випробувань зразків зі сталі 17Г1С, яка не була в експлуатації, зварного з'єднання (ЗЗ) газопроводу і аналіз впливу наводнювального середовища та концентраторів напружень на руйнування магістральних газопроводів.

Проводячи випробування, використовували два типи зразків:

Тип I – циліндричний зразок, гладка робоча частина, що охоплює всі зони зварного з'єднання, основний метал (ОМ), зона термічного впливу (ЗТВ) та зона шва (ЗШ).

Тип II – циліндричний зразок із концентратором у певній зоні ЗЗ. Використання зразків такої геометрії дає змогу вивчити вплив наводнювання на різні зони ЗЗ, а також виявити вплив концентрації напружень та ефект наводнювання для тих зон, метал яких руйнувався при використанні зразків типу I.

Зразки навантажували розтягом сталюю швидкістю, прийнятою при випробуваннях для отримання стандартних механічних властивостей при розтягу –  $3 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Визначали вплив наводнювання зразків на їх механічну поведінку при розтязі. Дослідним шляхом відпрацювали режими наводнення та схеми випробувань.

Перша схема: зразки попередньо наводнювали протягом 1 год. за певною густиною струму поляризації, припиняли наводнювання і навантажували механічно на повітрі. Така схема давала змогу визначати вплив внутрішнього (абсорбованого металом) водню на механічну поведінку сталі. На рис. 2 подано результати випробувань за такою схемою для різних рН і густини струму стосовно відносного звуження. Аналіз отриманих результатів випробувань за свідчує, що для середовища із рН1 – впливу попереднього наводнювання не виявлено навіть якщо струм поляризації становить  $10 \text{ А/дм}^2$ , що вважається дуже інтенсивним наводнюванням. Тому для подальших випробувань дану схему не використовували.

Друга схема випробувань: зразки попередньо наводнювали протягом 30 хв. і, не припиняючи наводнювання, механічно навантажували. Ця схема дає можливість виявити не тільки вплив водню, попередньо абсорбованого металом, але й в процесі навантаження (під час механічного навантаження руйнуються плівки, оголюється свіжа поверхня металу, яка набагато легше абсорбує метал, до того ж напружений розтягом метал також інтенсивніше наводнюється), що відповідає умовам експлуатації газопроводу з нерівномірним газоспоживанням. На

рис. 3 подано результати випробувань стосовно не перериваючи наводнювання, навантажували

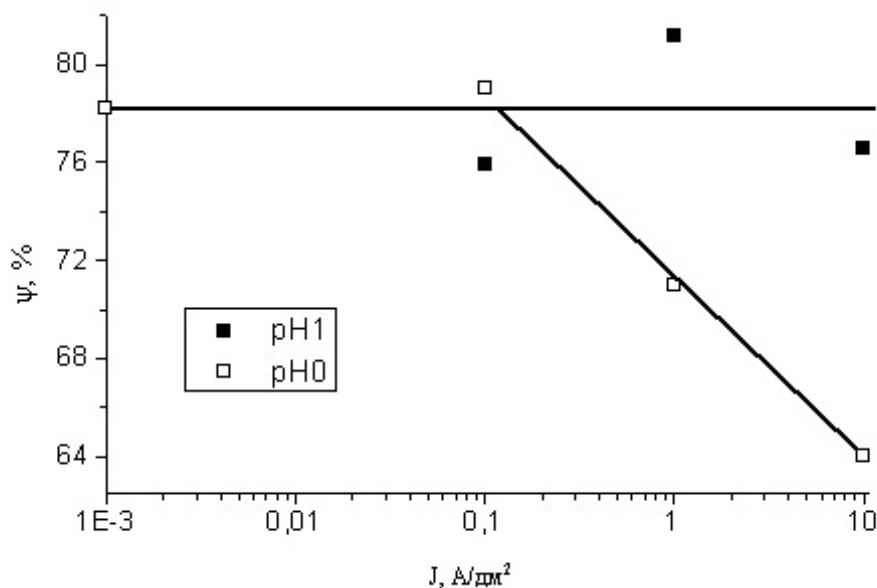


Рисунок 2 — Залежність відносного звуження від струму поляризації та pH середовища (схема 1)

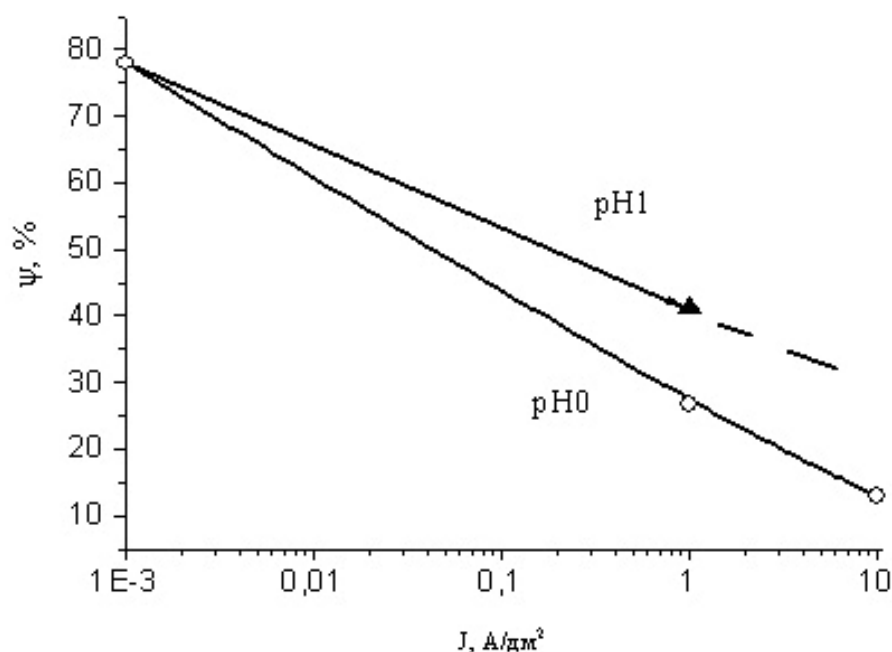


Рисунок 3 — Залежність відносного звуження від струму поляризації та pH середовища (схема 2)

відносного звуження.

Аналіз отриманих результатів випробувань свідчить, що з пониженням pH ефект наводнення зростає, але і при pH1 він суттєвий і проявляється при низьких струмах поляризації. Відпрацювавши у відповідних середовищах режим наводнення та схеми випробувань, у подальших дослідженнях за базову прийняли таку методику. Наводнювальне середовище pH 1, густина струму поляризації 0,01, 0,1 та 1 А/дм². Зразки перед механічним навантаженням піддавали катодній поляризації протягом 30 хв. і,

активним розтягом до руйнування, реєструючи діаграму „сила-переміщення активного захоплення”. Її опрацювання дало змогу визначати границю міцності  $\sigma_B$ , границю текучості  $\sigma_{0,2}$ , відносне видовження  $\delta$ . Аналізуючи зруйновані зразки, визначали відносне звуження  $\psi$ . Результати механічних випробувань представлені в таблиці 1.

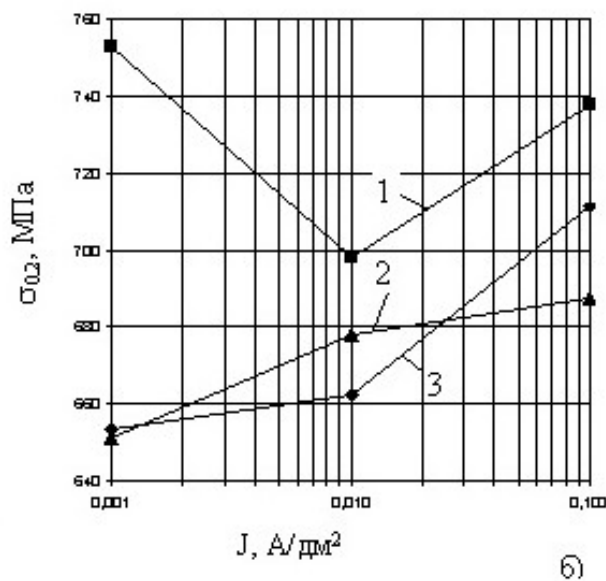
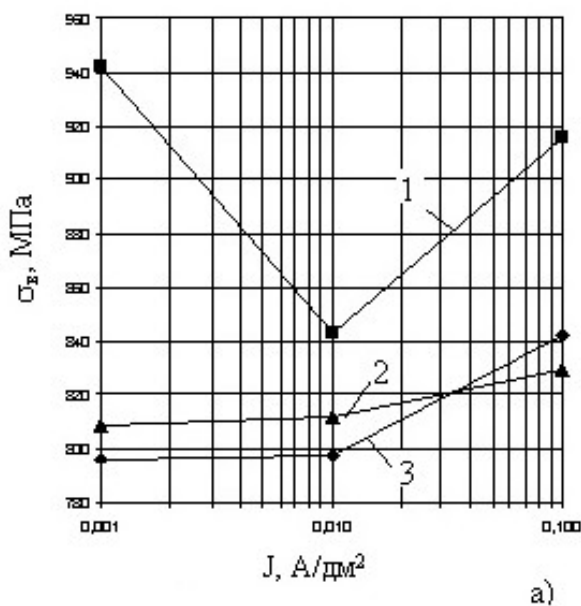
З метою виявлення впливу наводнення на різні зони ЗЗ, концентрації напружень на ефект наводнення, проведені механічні випробування на зразках II типу. На рис. 4 подані результати

механічних випробувань. Слід зазначити, що кількісно показники міцності вищі порівняно з даними випробувань гладких зразків, що відображає ефект концентрації напружень – утруд-

ві нижча пластичність та вища міцність. Якщо таке порівняння провести для поляризації густиною  $0,1 \text{ А/дм}^2$  і до уваги взяти показник  $\psi$  як такий, що найбільш однозначно характеризує

Таблиця 1 – Результати механічних випробувань

J, А/дм <sup>2</sup>	Середовище	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , мм	$\psi$ , %
0,001	pH 1	560	453	0,72	77
	pH 0	560	453	0,72	77
0,1	pH 1	560	453	0,58	55
	pH 0	539	472	0,46	45
1	pH 1	560	453	0,5	45
	pH 0	525	480	0,35	25



1 – ЗШ; 2 – ЗТВ; 3 – ОМ

Рисунок 4 — Залежність границь міцності (а) та текучості (б) від струму поляризації

нення пластичної деформації. Важко також визначити відносне видовження для таких зразків (рис. 5). Для ОМ отримано відчутне зниження характеристик пластичності при загальній закономірності зростання ефекту зі збільшенням густини струму катодної поляризації та деяке підвищення характеристик міцності. Для ЗТВ однозначна залежність механічних властивостей зберігається тільки для показника  $\psi$ . Це саме стосується і ЗШ – можна тільки відзначити відсутність впливу наводнювання за найменшої густини струму  $0,01 \text{ А/дм}^2$ .

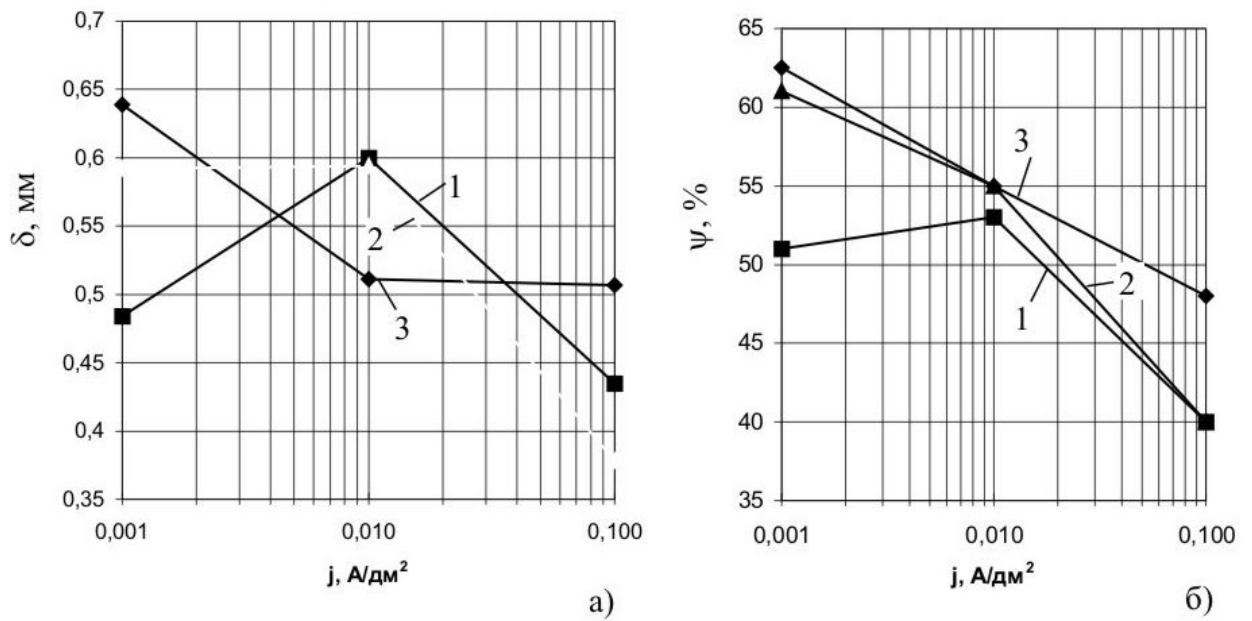
Провівши аналіз зруйнованих зразків видно, що руйнування проходить по ЗШ. Це означає, що ЗШ є найбільш чутливим до крихкого руйнування в умовах наводнювання сталі 17Г1С, яка широко використовується для виготовлення магістральних газопроводів. Необхідно відзначити, що ці показники слід вважати умовними у випадку випробувань зразків із концентратором напружень, тому вони можуть використовуватись тільки в порівняльних цілях.

Порівняльний аналіз різних зон ЗШ засвідчує, що для випробувань на повітрі ЗШ власти-

спад пластичності під дією наводнювання, то ОМ властива менша чутливість до водневої крихкості. В той же час ЗШ і ЗТВ властиві однакові значення  $\psi$ . Це вказує на те, що ЗТВ, незважаючи на пластичність у вихідному стані на рівні ОМ, за умов наводнювання виявляє схильність до крихкого руйнування вже на рівні ЗШ.

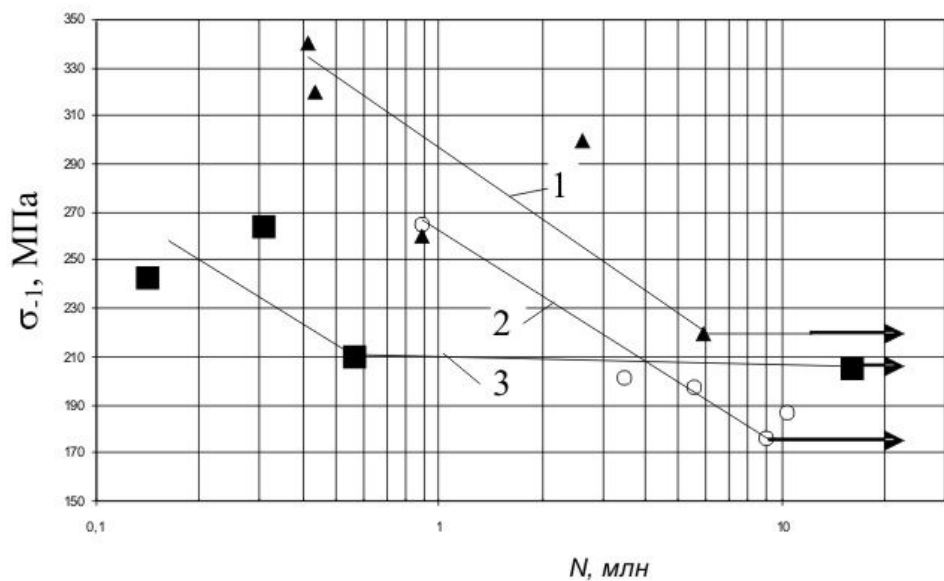
Металографічний аналіз циліндричних поверхонь зруйнованих зразків виявив їх розтріскування по довжині робочої поверхні. Деформація в цих місцях сумувалася в загальній ресторованій деформації і була відбита в деформації робочої частини і відповідно показника  $\delta$ . Очевидно, що цей „артефакт” і спричинив неоднозначний вплив наводнювання на показники пластичності та міцності. Звідси тільки параметр  $\psi$ , що визначався за аналізом зруйнованого зразка, слід вважати найбільш інформативним і об'єктивним при визначенні схильності ЗШ до водневої крихкості.

Проведені втомні випробування двох типів зразків при малій кількості циклів навантаження частотою  $0,3 \text{ Гц}$ . Отримані результати дають



1 – ЗШ; 2 – ЗТВ; 3 – ОМ

**Рисунок 5 — Залежність видовження (а) та відносного звуження (б) від струму поляризації**



1 – циліндричні гладкі зразки I – типу; 2 – зразки з концентратором у ЗШ;  
3 – зразки з концентратором у ЗТВ

**Рисунок 6 — Криві втоми 33 сталі 17Г1С на повітрі**

можливість встановити границю втоми як для циліндричних зразків із гладкою робочою частиною, яка охоплює всі зони ЗЗ, так і для зразків із концентратором у певній зоні ЗЗ. Як відомо, вплив концентрації напружень на втому сталі на повітрі характеризується коефіцієнтом  $\beta_k$ . Чим вищий цей коефіцієнт, тим вища стійкість сталі проти негативного впливу концентрації напружень на границю втоми. Результати випробувань представлені кривими втоми і зображені на рисунку 6.

Під час випробувань із концентраторами в ЗТВ та ЗШ границя втоми, відповідно рівна 195 МПа (крива 3, рис.6), 175 МПа (крива 2, рис.6). Отримані графічні залежності дають змогу визначити коефіцієнти  $\beta_k$  як для ЗТВ, так і для ЗШ

$$\beta_{kЗТВ} = \frac{\sigma_{-1ЗТВ}}{\sigma_{-1}} = 0,88;$$

$$\beta_{kЗШ} = \frac{\sigma_{-1ЗШ}}{\sigma_{-1}} = 0,79.$$

Аналіз характеру зміни кривих свідчить, що при випробуванні на повітрі для зразків як І-го, так і ІІ-го типів є горизонтальна ділянка, яка відповідає границі втоми. Для зразків І типу границя втоми рівна 220 МПа (крива 1, рис. 6).

**Висновок.** Порівняння результатів випробувань зразків різних типів дало змогу виявити вплив концентрації напружень на чутливість до водневої крихкості ЗШ, по якому відбувалось руйнування гладких зразків. При аналізі слід брати до уваги такі два чинники впливу концентрації напружень:

а) концентратор напружень утруднює пластичну деформацію в зоні концентратора, тобто метал веде себе менш пластично;

б) концентрація водню за однакових умов катодної поляризації повинна бути вищою.

Таким чином, встановлені показники є важливими для оцінки забезпечення стійкості газопроводів проти втомних руйнувань, для правильного та раціонального вибору величини допустимого напруження з урахуванням поверхневих концентраторів у різних зонах ЗЗ, а також для прогнозування ресурсу роботи магістральних газопроводів.

### Література

1. Похмурський В.І. Коррозионная усталость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 207 с.

руйнування гірських порід та в запобіганні динамічних явищ на основі керування станом гірського масиву [1]. Однак пряме перенесення в практику глибокого буріння рішень, які мають місце в гірничій справі, неможливе. Це пов'язано з тим, що бурова свердловина, яка являє собою різновидність гірничої виробки, суттєво

2. Крижанівський Є.І., Тараєвський О.С. Вплив нерівномірності газоспоживання на напружений стан трубопроводу // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – №3(12). – С.31-34.

3. Крижанівський Є.І., Цирульник О.Т., Петрина Д.Ю. Вплив наводнення та попереднього пластичного деформування сталі на її тріщиностійкість // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1999. – №5. – С.67-70.

4. Банахевич Ю.В., Юськів В.М., Дзюбик А.Р. Дослідження напруженого стану в зварних з'єднаннях труб із врахуванням структурних змін // Науковий вісник Івано-Франківського національного університету нафти і газу. – 2003. – №1 (5). – С. 118-121.

5. Банахевич Ю.В., Осадчук В.А., Дзюбик А.Р. Визначення залишкових напружень в околі кільцевого зварного з'єднання труб з урахуванням структурних змін в зоні термічного впливу // Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ. – 2003. – №1(6). – С. 77-81.

6. Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Кінетика деформування сталі трубопроводу при низькочастотній втомі // Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ. – 2001. – №11. – С. 62-67.

УДК 622.026

## ЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА СТАНУ ГІРСЬКОГО МАСИВУ ПРИ БУРІННІ ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИН

Е.М.Барановський

Комплексна лабораторія технології буріння та кріплення свердловин ПВ УкрДГРІ  
79018, м. Львів, вул. Тургенєва, 33; к. 45; тел. (032) 2373126; e-mail: pvukrdgri@mail.lviv.ua

Статья посвящена исследованию влияния на энергетическую оценку состояния горного массива изменения его потенциальной энергии при бурении глубоких скважин. Выведены формулы для определения удельной потенциальной энергии деформации и её составляющих. Изложены условия прочности горной породы при действии на неё удельных потенциальных энергий изменения объёма и формоизменения. Установлен характер зависимости энергии горного массива от глубины скважины, плотности бурового раствора и физико-механических свойств горных пород. Разработана методика определения начала саморазрушения породы и дискования керна.

Clause is devoted to research of influence on a power estimation of a condition of a hills, change of his potential energy at drilling deep chinks. Formulas for definition of specific potential energy of deformation and its components are deduced. Conditions of durability of rock are stated at action on it specific potential energy changes of volume and change of the form. Character of dependence of energy of a hills from depth of a chink, density of a chisel solution and physicomechanical properties of rocks is established. The technique of definition of the beginning of self-destruction of breed.

З утвердженням в гірничій науці уявлення про гірський масив як про систему з великим запасом накопиченої потенціальної енергії відкривались можливості у створенні нових способів

відрізняється від шахтних стовбурів. Різниця полягає в тому, що на напружено-деформований стан гірських порід довкола свердловини мож-